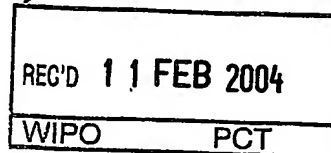


PCT/EP 03 / 13318

PRIORITY DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) OR (b)



Rec'd PCT/PTO 27 MAY 2005

**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung
einer Patentanmeldung**

Aktenzeichen: 102 55 857.4

Anmeldetag: 29. November 2002

Anmelder/Inhaber: Forschungsverbund Berlin eV, Berlin/DE

Bezeichnung: Magnetische Logikeinrichtung

IPC: H 03 K 19/18

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 10. Dezember 2003
Deutsches Patent- und Markenamt
Der Präsident
Im Auftrag

Ebert

BEST AVAILABLE COPY

Magnetische Logikeinrichtung

Die Erfindung betrifft Verfahren zum Betrieb einer magnetischen Logikeinrichtung, mit der bei mindestens einer Logikoperation mittels eines magnetischen Bauelements aus logischen Eingangsgrößen mindestens eine logische Ausgangsgröße gebildet wird. Die Erfindung betrifft auch magnetische Logikeinrichtungen zur Durchführung derartiger Verfahren und Logikschaltungen, die mit einer Vielzahl derartiger Logikeinrichtungen ausgestattet sind.

Logikschaltungen, die aus einer Vielzahl frei programmierbarer Bauelemente bestehen und rekonfigurierbare Systeme bilden, sind allgemein bekannt. Es ist beispielsweise eine Anordnung programmierbarer Logikeinrichtungen vorgesehen, die über programmierbare Verbindungen je nach der aktuellen Aufgabe koppelbar sind (sogenannte "Field Programmable Gate Arrays, FPGA"). FPGA-Schaltungen benötigen für die Programmierbarkeit Halbleiterbauelemente, die mit Hilfe eines gespeicherten Ladungszustandes die Logik der Schaltung festlegen. Dafür werden ferroelektrische Materialien verwendet, die prinzipiell in der Lage sind, eine Ladung über eine lange Zeit zu speichern und damit einen definierten Zustand stabil zu halten. Nachteilig ist jedoch, dass Umprogrammierungen, bei denen die Ladung verändert wird, mit einer mechanischen Belastung des speichernden Materials verbunden sind. Daher sind die Betriebsfrequenz und die Lebensdauer von Logikeinrichtungen mit ferroelektrischen Speichern begrenzt.

Die Beschränkung auf eine bestimmte Anzahl von Umschaltzyklen kann mit magnetischen Logikeinrichtungen überwunden werden, deren logische Funktion beispielsweise durch ein magneto-resistives Element (im Folgenden: MR-Element) ausgeführt wird. MR-Elemente besitzen einen elektrischen Widerstand, der auf der Grundlage z. B. des GMR- (giant magnetoresistive) oder des TMR- (tunneling

magnetoresistive)-Effekts durch ein äußeres Magnetfeld verändert und zur Erzeugung von logischen Signalen verwendet werden kann (siehe W. C. Black et al. in "Journal of Applied Physics", Band 87, 2000, S. 6674-6679).

MR-Elemente, die in der Regel Dünnschichtbauelemente sind, können beliebig oft umgeschaltet werden und sind dadurch gekennzeichnet, dass ein aktueller Betriebszustand (hier: Magnetisierungszustand) spannungslos gespeichert wird (Nichtflüchtigkeit der Information). Daher besitzen MR-Bauelemente eine erheblich reduzierte Leistungsaufnahme und des weiteren die Fähigkeit, Informationen prinzipiell mit extrem kurzen Impulsen (fs) und extrem hohen Frequenzen (GHz) zu schreiben oder zu lesen (siehe T. Gerrits et al. in "Nature", Band 418, 2002, S. 509). Bisher werden MR-Elemente wegen der genannten Vorteile als Speicherbausteine (MRAM; Magnetic Random Access Memory, siehe z.B. DE 198 53 447), d. h. als passives Bauelement verwendet. Es gibt Versuche, MR-Elemente auch als aktive Bauelemente in Logikeinrichtungen zu verwenden, wie im Folgenden dargestellt wird.

In DE 100 36 356 ist ein MR-Element mit drei magnetisierbaren Schichten beschrieben, das eine so genannte magnetische Diode bildet. Durch Umschaltung der Magnetisierungsrichtung einer der Teilschichten kann eine logische Funktion invertiert werden (z. B. AND zu NAND), so dass beschränkt eine Funktionsauswahl (Negation) möglich ist. Eine frei programmierbare Logikschaltung, die auch ein Umschalten zwischen verschiedenen Grundoperationen (z. B. AND zu OR) erfordert, ist mit der Logikeinrichtung gemäß DE 100 36 356 jedoch nicht realisierbar.

In DE 100 44 395 C1 wird ein Baustein für eine programmierbare magnetische Logik vorgeschlagen, der zwei MR-Elemente jeweils mit einer magnetischen Informationsschicht und einer magnetischen Referenzschicht aufweist. Die Anwendung dieses Bausteins

ist auf die Erzeugung zweier Ausgangssignale beschränkt, die zueinander invertiert sind.

In der o. g. Publikation von W. C. Black et al. wird eine feldprogrammierte magnetische Logikschaltung beschrieben, die mehrere MR-Elemente und zugeordnete MR-Referenzelemente umfasst. Um ein Logikgrundelement zu bilden, werden mindestens drei MR-Elemente benötigt. Welche logische Funktion das Logikgrundelement ausführt, wird durch eine Einstellung an einem MR-Element und seinem zugeordneten MR-Referenzelement definiert. Der Nachteil dieser herkömmlichen Logikschaltung besteht im hohen Schaltungsaufwand. Des Weiteren ist zur Funktionsprogrammierung das Umschalten von mindestens zwei MR-Elementen erforderlich.

Von W. C. Black et al. wird in der genannten Publikation des weiteren die Logikfunktion eines einzelnen MR-Elements erläutert, das schematisch in Figur 8 illustriert ist. Die herkömmliche Logikeinrichtung 10' umfasst ein MR-Element 11' mit magnetisierbaren Schichten (Stellelementen) 12', 13', zwei Eingangsleitungen 14', 15', einer Ausgangsleitung 16' und einer RESET-Leitung 17'. Die Eingangsleitungen 14', 15' sind zu einer gemeinsamen Signalleitung 18' verbunden, mit der das MR-Element 11' magnetisierbar ist. Mit der Logikeinrichtung 10' wird eine logische OR-Operation wie folgt ausgeführt.

Zunächst erfolgt ein Rücksetzen des MR-Elements 11', indem die RESET-Leitung 17' mit einem vorbestimmten RESET-Strom beaufschlagt wird. Die Stellelemente 12', 13' werden dadurch beispielsweise mit antiparallelen Magnetisierungen magnetisiert (siehe Pfeile). Entsprechend ist der Widerstand des MR-Elements 11' zunächst hoch, so dass das logische Ausgangssignal 0 einer logischen "0" entspricht. Wenn an mindestens einer oder beiden der Eingangsleitungen 14', 15' ein logisches "1"-Signal anliegt (Eingangsstrom: Ein), wird eine der Schichten (z. B. 12') ummagnetisiert, während die andere Schicht ihre Magnetisierung beibe-

hält. Im Ergebnis verringert sich der Widerstand des MR-Elements, und es ergibt sich ein Ausgangssignal "1" (OR-Funktion). Die entsprechende NOR-Funktion kann durch Umkehrung der Magnetisierung der anderen Schicht (hier: 13') erzielt werden.

Nachteilig an der Logikeinrichtung 10' mit dem einzelnen MR-Element ist die Beschränkung auf eine bestimmte Logikfunktion. Um nicht die OR-, sondern die AND-Funktion zu realisieren, müssen andere Signalströme eingestellt oder andere magnetische Materialien verwendet werden.

Ein wesentlicher Nachteil der Logikeinrichtung 10' besteht ferner darin, dass vor jeder logischen Operation das MR-Element durch den RESET-Schritt in den vorgegebenen Ausgangszustand gebracht werden muss. Der RESET-Schritt dient allein der Einstellung des Ausgangszustandes und stellt dadurch einen zusätzlichen Schalt- und Zeitaufwand dar, der zu der eigentlichen logischen Operation nicht beiträgt.

In DE 100 53 206 C1 ist eine frei programmierbare Logikeinrichtung ebenfalls mit einem einzelnen MR-Element beschrieben, das als magnetische Stellelemente zwei magnetische Schichten enthält. Die Stellelemente sind analog zu Figur 8 durch Beaufschlagung eines elektrischen Leiters mit Signalströmen, die für logische Eingangsgrößen charakteristisch sind, einzeln oder gemeinsam magnetisierbar. Je nach der gegebenen Magnetisierung ergibt sich ein bestimmter elektrischer Widerstand des MR-Elements, der als logische Ausgangsgröße weiterverarbeitet werden kann. Mit der Logikeinrichtung gemäß DE 100 53 206 C1 kann entweder die Logikfunktion AND/NAND oder die Logikfunktion OR/NOR realisiert werden. Um zwischen beiden Logikfunktionen umzuschalten, ist ein zusätzliches magnetisches Feld vorgesehen, das senkrecht zu den Schichten des MR-Elements ausgerichtet ist und mit dem die Koerzitivfeldstärke mit einem sogenannten Asteroid-Schaltverhalten

verändert werden kann. Je nachdem, ob das senkrechte Magnetfeld anliegt oder nicht, ändert sich die logische Funktion der Logikeinrichtung. Ein Nachteil besteht darin, dass eine zusätzliche Magnetisierungseinrichtung zur Erzeugung des senkrechten Magnetfeldes vorgesehen sein muss. Weitere Nachteile bestehen in Beschränkungen in Bezug auf die Auswahl des Materials, der physikalischen Eigenschaften, der Geometrie und der Dimensionen der Stellelemente, um das in DE 100 53 206 C1 notwendig geforderte Asteroid-Schaltverhalten zu erzielen. Des Weiteren ist auch bei der Logikeinrichtung gemäß DE 100 53 206 C1 vor jeder logischen Operation zunächst der zusätzliche RESET-Schritt vorgesehen.

Die herkömmlichen magnetischen Logikeinrichtungen sind somit generell durch die folgenden Nachteile gekennzeichnet. Bei den herkömmlichen magnetischen Logikeinrichtungen werden nicht alle physikalischen Eigenschaften (z. B. Magnetismus, Symmetrie) für das Logikverhalten der MR-Elemente genutzt. Der Aufbau und die Arbeitsweise herkömmlicher magnetischer Logikeinrichtungen sind daher übermäßig aufwendig und kompliziert. Die bekannten magnetischen Logikeinrichtungen sind jeweils für eine bestimmte Logikfunktion ausgelegt oder nur durch aufwendige Maßnahmen, wie z. B. das Anlegen eines zusätzlichen, senkrechten Magnetfeldes oder die Einstellung veränderter Stromwerte auf eine andere Logikfunktion umschaltbar. Dieses Problem verschärft sich noch, wenn eine Vielzahl von Logikeinrichtungen in einer Logikschaltung integriert werden soll. Die selektive Programmierung von Logikeinrichtungen ist nur beschränkt und mit großem Schalt- und Zeitaufwand möglich. Echte magnetische frei programmierbare Logikschaltungen sind daher bisher nicht verfügbar. Eine Lösung könnte zwar darin gesehen werden, dass innerhalb einer integrierten Schaltung mehrere Gruppen von Logikeinrichtungen jeweils für eine Logikfunktion vorgesehen und bei Bedarf verwendet werden. Dies bedeutet jedoch keine Funktionsprogrammierung, sondern nur eine Auswahl unter Bauelementen mit fest eingestellten Funktionen. Es ergibt sich eine hohe Redundanz und ein Verlust an

nutzbarer Integrationsdichte. Mit den herkömmlichen Verfahren, die analog zu den entsprechenden Techniken mit nichtmagnetischen Schaltungsanordnungen durchgeführt werden, ist eine Erhöhung der Integrationsdichte nur durch eine Verkleinerung der Strukturen zu erreichen. Ein zweiter genereller Nachteil ist die oben genannte RESET-Funktion, durch die Logikoperationen und damit der Betrieb von Logikschaltungen mit einer Vielzahl von einzelnen Logikeinrichtungen verlangsamt wird.

Die Aufgabe der Erfindung ist, verbesserte Verfahren zum Betrieb von Logikeinrichtungen bereitzustellen, mit denen die Nachteile der herkömmlichen Techniken überwunden werden. Erfindungsgemäße Verfahren sollen insbesondere eine freie Programmierbarkeit einzelner magnetischer Elemente (magnetischer Komponenten) für die verschiedenen Logikfunktionen ermöglichen, den Ablauf von Logikoperationen beschleunigen und mit einem geringen schaltungstechnischen Aufwand realisierbar sein. Es soll insbesondere die Integrationsfähigkeit im Rahmen integrierter Logikschaltungen erleichtert werden. Die Aufgabe der Erfindung ist es auch, eine verbesserte Logikeinrichtung bereitzustellen, mit der die Nachteile herkömmlicher Logikeinrichtungen überwunden werden und die sich insbesondere durch eine freie Programmierbarkeit und einen einfachen Aufbau mit verminderten Beschränkungen in Bezug auf die Materialien, die Geometrie und die Dimension von magnetischen Bauelementen auszeichnet.

Diese Aufgaben werden durch Verfahren und Logikeinrichtungen mit den Merkmalen gemäß den Patentansprüchen 1 oder 15 gelöst. Vorteilhafte Ausführungsformen und Anwendungen ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

Eine Grundidee der Erfindung ist es, ein Verfahren zum Betrieb einer magnetischen Logikeinrichtung, bei dem mindestens eine logische Operation durchgeführt wird, bei der aus logischen Eingangsgrößen (I_A , I_B) mit einer logischen Operatorfunktion F min-

destens eine logische Ausgangsgröße $O = F(I_A, I_B)$ gebildet wird, dahingehend weiter zu entwickeln, dass die Logikeinrichtung vor der Operation mit einem bestimmten Operator-Steuersignal (SET) auf einen Startzustand zur Ausführung der Operatorfunktion F eingestellt wird, wobei das Operator-Steuersignal aus einer Gruppe von verschiedenen Steuersignalen ausgewählt wird, mit denen verschiedene nichtflüchtige Startzustände der Logikeinrichtung gezielt einstellbar sind, die jeweils für bestimmte logische Funktionen charakteristisch sind.

Das erfindungsgemäße Verfahren wurde auf der Grundlage der folgenden Überlegungen der Erfinder entwickelt. Die Erfinder haben festgestellt, dass bei magnetischen Elementen, z. B. bei MR-Elementen mit zwei magnetischen Schichten, mit denen vier magnetisch unterscheidbare, nicht flüchtige Zustände realisierbar sind, bisher immer nur ein bestimmter Zustand als Ausgangspunkt zur Realisierung einer Logikfunktion verwendet wird. Auf diesen vorgegebenen Zustand wurde die Logikeinrichtung beim RESET-Schritt rückgesetzt. Hierzu im Gegensatz werden erfindungsgemäß alle magnetisch unterscheidbaren Zustände der Logikeinrichtung als frei wählbare Startzustände für ausführbare Logikoperationen verwendet. Die Einstellung des aktuellen Zustandes und damit der aktuell gewünschten Logikfunktion (Operatorfunktion F) als eine Auswahl verschiedener nichtflüchtiger Zustände aus dieser Gruppe erfolgt mit dem Operator-Steuersignal. Wenn im Zeitverlauf verschiedene Logikfunktionen ausgeführt werden sollen, wird eine Logikeinrichtung entsprechend aufeinander folgend mit verschiedenen Operator-Steuersignalen eingestellt.

Erfindungsgemäß wird insbesondere vorgeschlagen, magnetische Logikeinrichtungen mit einem einzelnen magnetischen Element, insbesondere einem einzelnen MR-Element sequentiell wie folgt zu betreiben. Zuerst erfolgt eine gezielte Einstellung oder Funktionsprogrammierung der Logikeinrichtung durch eine Auswahl des Operator-Steuersignals aus der Gruppe verschiedener Steuersigna-

le, mit denen verschiedene nichtflüchtige Startzustände einstellbar sind, die jeweils für verschiedene logische Funktionen charakteristisch sind (d. h. zur Auswahl der gewünschten Operatorfunktion aus der Gruppe verschiedener logischer Funktionen) und ein Setzen (SET) der Logikeinrichtung durch Beaufschlagung des magnetischen Elements mit dem ausgewählten Operator-Steuersignal. Mit dem Operator-Steuersignal wird die Logikeinrichtung entsprechend einer der möglichen nicht flüchtigen Konfigurationen eingestellt. Die Funktionsprogrammierung ersetzt verschiedene Vorgänge, die bei den herkömmlichen Logikeinrichtungen getrennt und mit großem Aufwand ausgeführt wurden, nämlich die hardwaretechnische Auswahl der Logikfunktion einerseits und den softwaremäßigen RESET-Schritt andererseits.

Das erfindungsgemäße Verfahren stellt auch gegenüber dem herkömmlichen Betrieb nichtmagnetischer Schaltungsanordnungen einen wesentlichen Unterschied dar. Bei nichtmagnetischen FPGA-Schaltungen ist die Zwischenspeicherung der Funktionsprogrammierung und der entsprechende Zyklusbetrieb nicht oder nur für begrenzte Zeit (Haltbarkeit der Speicherschicht) möglich.

Ein wesentlicher Vorteil der Erfindung besteht darin, dass die Logikeinrichtungen in Logikschaltungen integriert werden können und die in einer integrierten Logikschaltung enthaltenen Logikeinrichtungen (individuelle Logikgrundelemente) durch die sequentielle Funktionsprogrammierung mit erhöhter Effektivität genutzt werden können. Während bei herkömmlichen Logikschaltungen in der Regel vier Gruppen von Logikeinrichtungen enthalten waren, die jeweils für eine bestimmte Logikfunktion ausgelegt waren, können bei einer erfindungsgemäß betriebenen Logikschaltung alle Logikeinrichtungen wahlweise für alle aktuell gewünschten Logikfunktionen verwendet werden. Somit kann mit weniger Logikeinrichtungen (in der Regel: Faktor 4) die Funktionsfähigkeit einer Logikschaltung voll erhalten bleiben.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird das Operator-Steuersignal aus einer Gruppe von verschiedenen Steuersignalen ausgewählt, um gezielt Startzustände der Logikeinrichtung einzustellen, die jeweils für eine logische Funktion aus der Gruppe der logischen AND-, OR-, NAND- und NOR-Funktionen charakteristisch sind. Diese Ausführungsform kann in Bezug auf die Flexibilität der Funktionsausführung Vorteile haben, da alle vier, in der Praxis interessierenden logischen Grundfunktionen einstellbar sind. Gemäß einer alternativen Ausführungsform der Erfindung, die Vorteile in Bezug auf einen vereinfachten Aufbau der Logikeinrichtung besitzen kann, werden die Steuersignale so ausgewählt, dass mit ihnen Startzustände einstellbar sind, die jeweils für eine logische Funktion aus der Gruppe entweder der logischen AND- und OR-Funktionen oder der logischen NAND- und NOR-Funktionen charakteristisch sind.

Wenn die Steuersignale Steuerstromsignale umfassen, unter deren Wirkung Magnetfelder erzeugt werden, durch die im magnetischen Element die jeweilige logische Funktion eingestellt wird, können sich weitere Vorteile in Bezug auf die Umsetzung des erfindungsgemäßen Verfahrens mit verfügbaren Strukturen magnetischer Bauelemente ergeben. Besonders vorteilhaft ist es, wenn die Steuerstromsignale über Eingangsleitungen zur Eingabe der Eingangsgrößen (I_A , I_B) der Logikeinrichtung zugeführt werden. Bei dieser Gestaltung vereinfacht sich der Aufbau einer Logikschaltung mit einer Vielzahl integrierter Logikeinrichtungen. Die Steuerstromsignale können darüber hinaus konstante Strombeträge aufweisen. Dies stellt einen erheblichen Vorteil gegenüber herkömmlichen Techniken (siehe W. C. Black et al.) dar, bei denen gegebenenfalls zur Umschaltung der Logikfunktion verschiedene Strombeträge eingespeist werden müssen.

Die Steuerstromsignale können durch kontinuierliche, geschaltete Ströme gebildet werden, mit denen das magnetische Element beaufschlagt wird. Vorteilhafterweise kann sich jedoch eine weitere

Verbesserung der Kompatibilität mit den in der Praxis verwendeten elektronischen Schaltkreisen und eine Verringerung des Energieverbrauches und damit der Wärmeentwicklung ergeben, wenn die Steuerstromsignale getaktete oder gepulste Ströme umfassen.

Typischerweise wird die Logikeinrichtung zur Eingabe der logischen Eingangsgrößen (I_A , I_B) mit Eingangsstromsignalen beaufschlagt. Die Eingangsstromsignale werden vorzugsweise so gebildet, dass sie die gleichen Beträge wie die Steuerstromsignale aufweisen.

Die Erfindung kann allgemein mit allen magnetischen Logikeinrichtungen ausgeführt werden, die mindestens ein magnetisches Element mit mehreren, magnetisch unterscheidbaren, nicht flüchtigen Zuständen enthalten. So besitzt z. B. ein magnetoresistives Element mindestens zwei magnetische Stellelemente mit verschiedenen Koerzitivfeldstärken, an denen mit dem Operator-Steuersignal einer von mindestens zwei Startzuständen einstellbar ist. Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung sind die Koerzitivfeldstärken und die Strombeträge der Stromsignale so abgestimmt, dass beide Stellelemente durch das Operator-Steuersignal verstellt werden können. Dadurch sind mit zwei Stellelementen vorteilhafterweise alle vier möglichen Konfigurationen von Magnetisierungsrichtungen realisierbar. In diesem Modus sind beide Stellelemente frei verstellbar ("unpinned"). Alternativ ist die Koerzitivfeldstärke von einem der Stellelemente so hoch gewählt, dass es mit den Stromsignalen nicht verstellt werden kann (Modus: "pinned"). In diesem Fall sind nur zwei Konfigurationen von Magnetisierungseinstellungen als Startzustand und damit nur zwei Logikfunktionen realisierbar. Es können sich aber Vorteile in Bezug auf die Einfachheit des Aufbaus der Logikeinrichtung ergeben.

Ein weiterer Gegenstand der Erfindung ist ein Verfahren zum Betrieb einer magnetischen Logikschaltung, die eine Vielzahl von

Logikeinrichtungen umfasst, mit denen gleichzeitig oder aufeinander folgend eine Vielzahl logischer Operationen nach den oben beschriebenen Verfahren ausgeführt werden.

Vorteilhafterweise kann jede Logikeinrichtung gemäß einem vorgegebenen Arbeitstakt laufend und aufeinander folgend gleiche oder verschiedene logische Operationen ausführen. Damit kann Redundanz vermieden und die Effektivität der Logikschaltung erheblich gesteigert werden.

Ein weiterer Gegenstand der Erfindung ist eine magnetische Logikeinrichtung mit mindestens einem logischen magnetischen Bauelement, mindestens zwei Eingängen und mindestens einem Ausgang, die zur Ausführung mindestens einer logischen Operation eingerichtet ist, bei der aus Eingangsgrößen (I_A , I_B) mit einer Operatorfunktion F mindestens eine Ausgangsgröße $O = F(I_A, I_B)$ gebildet wird, wobei das magnetische Element mit einer Steuerschaltung zur Erzeugung eines bestimmten Operator-Steuersignals zur Ausführung der Operatorfunktion F aus einer Gruppe verschiedener Steuersignale, die jeweils für verschiedene logische Funktionen charakteristisch sind, verbunden ist.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung weist die Steuerschaltung eine Stromquelle zur Erzeugung verschiedener Stromsteuersignale entsprechend verschiedenen logischen Funktionen und eine Schalteinrichtung auf, mit der eines der Stromsteuersignale als Operator-Steuersignal an das magnetische Element gegeben werden kann.

Die Schalteinrichtung kann beispielsweise programmgesteuert arbeiten. Weitere Vorteile können sich ergeben, wenn die Steuerschaltung einen Operatorfunktions-Wähler aufweist, mit dem die Schalteinrichtung verbunden ist.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Logikeinrichtung ist das mindestens eine magnetische Element ein magnetoresistives Element (MR-Element). Es können sich Vorteile dahingehend ergeben, dass magnetoresistive Elemente an sich verfügbar und in ihrer Verwendung gut handhabbar sind. Die Umsetzung der Erfindung ist aber prinzipiell nicht auf MR-Elemente beschränkt, sondern generell mit magnetischen Stellelementen realisierbar, deren relative Orientierung detektierbar ist, z. B. mit optischen oder magnetostriktiven Elementen.

Wesentliche Vorteile erfindungsgemäßer Logikeinrichtungen bestehen darin, dass sie 1. universell einsetzbar, d.h. als Logik- oder als Speicherelemente verwendbar sind, 2. frei programmierbar sind, also jeweils gewünschte Logikfunktionen eingestellt werden können, und 3. nicht flüchtig sind (Informationen und Logikfunktionen bleiben erhalten). Des Weiteren zeichnen sie sich durch eine maximale Einfachheit im Aufbau aus. Beschränkungen auf bestimmte Materialien oder Geometrien können vermieden werden.

Weitere Vorteile und Einzelheiten der Erfindung werden aus der folgenden Beschreibung der beigefügten Zeichnungen ersichtlich. Es zeigen:

Fig. 1: eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Logikeinrichtung,

Fig. 2: ein Flussdiagramm zur Illustration des erfindungsgemäßen Verfahrens,

Fig. 3: eine perspektivische Ansicht einer ersten Ausführungsform eines erfindungsgemäß verwendeten MR-Elements,

Fig. 4: eine tabellarische Zusammenfassung der vier magnetischen Startzustände des MR-Elements und der zugehörigen logischen Funktionen,

Fig. 5: Beispiele für Taktsequenzen beim Betrieb erfindungsgemäßer Logikeinrichtungen,

Fig. 6: eine perspektivische Ansicht einer weiteren Ausführungsform eines erfindungsgemäß verwendeten MR-Elements,

Fig. 7: eine schematische Darstellung einer erfindungsgemäßen Logikschaltung mit einer Vielzahl von Logikeinrichtungen, und

Fig. 8: eine schematische Darstellung einer herkömmlichen Logikeinrichtung (Stand der Technik).

Die Umsetzung der Erfindung wird im Folgenden nach einer allgemeinen Darstellung gemäß Figur 1 unter beispielhaften Bezug auf die Verwendung von magnetoresistiven Dünnschichtbauelementen beschrieben. Es wird jedoch betont, dass die Verwendung von MR-Dünnschichtbauelementen nicht zwingend erforderlich ist. Vielmehr kann das erfindungsgemäße Verfahren generell mit magnetischen Bauelementen realisiert werden, die die Nutzung verschiedener magnetisch unterscheidbarer Startzustände als Logikfunktionen zulassen. Des weiteren ist die Erfindung nicht zwingend auf magnetische Bauelemente mit 2 Eingängen und 1 Ausgang beschränkt, sondern entsprechend auch mit mehr Ein- oder Ausgängen umsetzbar.

Die Gruppe der erfindungsgemäß verwendbaren magnetischen Elemente umfasst insbesondere solche MR-Elemente, die auf der Grundlage der Magnetowiderstandseffekte AMR (anisotropic magnetoresistance), GMR (giant magnetoresistance), TMR (tunneling magne-

toresistance), CMR (colossal magnetoresistance) und GMI (giant magnetoimpedance) beruhen (siehe Broschüre "XMR-Technologien"-Technologieanalyse: Magnetismus, Band 2, VDI-Technologiezentrum "Physikalische Technologien", Düsseldorf, Deutschland, 1997, S. 11 - 46).

Die Parameter der MR-Elemente, wie z. B. die Materialien, Dicken, Geometrien, Stromstärken etc. werden gewählt, wie es an sich von herkömmlichen Anwendungen von MR-Elementen bekannt ist.

Schließlich wird betont, dass die Umsetzung der Erfindung nicht auf die im folgenden beispielhaft genannten logischen Funktionen beschränkt ist, sondern entsprechend mit davon abgeleiteten logischen Funktionen oder arithmetischen Funktionen oder anderen logischen Funktionen, wie zum Beispiel Komplementbildungen, bit-bezogenen Abfragen, Vergleichen, Invertierungen etc. anwendbar ist.

Figur 1 zeigt schematisch eine erfindungsgemäße Logikeinrichtung 10 mit einem magnetoresistiven Bauelement 11 (MR-Element 11), das zwei magnetische Stellelemente 12, 13 jeweils mit zwei magnetisch unterscheidbaren Zuständen aufweist, und einer Steuerung 20. Die Stellelemente 12, 13 des MR-Elements 11 bestehen aus magnetischen Materialien, von denen das eine Material magnetisch weicher als das andere Material ist. Die magnetischen Zustände unterscheiden sich durch die jeweiligen Magnetisierungsrichtungen der Stellelemente 12, 13. Die Logikeinrichtung 10 umfasst mindestens zwei Eingänge 14, 15 und mindestens einen Ausgang 16, die zur Eingabe und Ausgabe logischer Eingangs- und Ausgangsgrößen am MR-Element 11 eingerichtet sind. Die Eingänge 14, 15 sind mit mindestens einem elektrischen Signal-Leiter verbunden, mit dem bei Beaufschlagung mit einem elektrischen Signalstrom ein Magnetfeld induziert wird, durch das die Magnetisierungsrichtung mindestens eines der Stellelemente 12, 13

veränderlich ist. Der Ausgang 16 ist Teil eines Stromkreises (nicht dargestellt), in dem der elektrische Widerstand des MR-Elements 11 in an sich bekannter Weise messbar ist. Es wird betont, dass die logische Ausgangsgröße $O = F(I_A, I_B)$ alternativ durch andere Messverfahren detektiert werden kann, die geeignet sind, zwischen paralleler und antiparalleler Konfiguration der beiden magnetischen Stellelemente zu unterscheiden, z. B. bei optischen oder magnetostriktiven Verfahren

Die Steuerschaltung 20 dient der Erzeugung des Operator-Steuersignals und umfasst beispielsweise eine Stromquelle 21, eine Schalteinrichtung 22 und gegebenenfalls einen Operatorfunktions-Wähler 23. Die Stromquelle 21 ist über die Schalteinrichtung 22 mit mindestens einem elektrischen Leiter verbunden, mit dem die Magnetisierungsrichtung mindestens eines der Stellelemente 12, 13 veränderlich ist. Dieser Leiter kann als eigenständiges Bauteil vorgesehen sein, ist aber vorzugsweise mit dem mindestens einen Signal-Leiter der Eingänge 14, 15 kombiniert. Einzelheiten der Verknüpfung der Steuerschaltung 20, der Eingänge 14, 15 und des Ausgangs 16 mit dem MR-Element 11 sind beispielhaft in den Figuren 3 und 6 gezeigt (siehe unten).

Wesentliche Schritte des erfindungsgemäßen Verfahrens sind in Figur 2 illustriert. Figur 2 zeigt einen Ausschnitt des Funktionsablaufs beim Betrieb einer Logikeinrichtung, der die Ausführung der logischen Funktion betrifft. Weitere Einzelheiten des Funktionsablaufs sind an sich von herkömmlichen FPGA-Schaltungen bekannt und werden daher hier nicht beschrieben. Gemäß Figur 2 erfolgt zuerst die Auswahl des Operator-Steuersignals SET, das für die Ausführung einer bestimmten logischen Funktion charakteristisch ist (Schritt 1). Das Operator-Steuersignal SET wird aus einer Gruppe verschiedener Steuersignale ausgewählt, die jeweils für verschiedene logische Funktionen charakteristisch sind. Die Auswahl erfolgt durch eine entsprechende Eingabe an die Steuerschaltung 20, z. B. durch ein Steuerprogramm oder mit dem Opera-

torfunktions-Wähler 23. Die Möglichkeit einer softwarebasierten Auswahl der Logikfunktion stellt einen wesentlichen Vorteil der Erfindung dar. Bei Schritt 2 wird die Steuerschaltung 20 mit dem aktuell gewählten Operator-Steuersignal SET beaufschlagt, so dass ein Startzustand entsprechend der gewünschten Operatorfunktion F eingestellt wird. Mit dem Operator-Steuersignal SET werden die Magnetisierungen der Stellelemente 12, 13 in einem einzelnen Schritt oder in zwei Teilschritten beispielsweise parallel oder antiparallel eingestellt, um den Startzustand für die nachfolgende logische Operation (Schritte 3, 4) zu bilden.

Hierzu werden die Eingänge 14, 15 mit den Eingangsgrößen (I_A , I_B) beaufschlagt (Schritt 3), so dass sich die Magnetisierungen der Stellelemente 12, 13 in charakteristischer Weise einstellen. Die Eingangsgrößen werden beispielsweise durch Stromsignale gebildet, die je nach ihrer Stromrichtung eine logische "1" oder "0" repräsentieren. Die Stromsignale können zu einer Erhaltung des Startzustandes oder zu einer Ummagnetisierung mindestens eines der Stellelemente 12, 13 führen (Schritt 4). Im Ergebnis ist die Konfiguration der beiden Stellelemente 12, 13 erhalten geblieben oder verändert. Im Falle eines MR-Elementes (11) würde für den aktuellen Widerstand eine charakteristische Spannungs- oder Stromgröße wird am Ausgang 16 ausgelesen (Schritt 5). Die Ausgangsgröße O ist vom Startzustand, der durch die Operatorfunktion F bestimmt ist, und den Eingangsgrößen (I_A , I_B) abhängig: $O = F(I_A, I_B)$.

Erfindungsgemäß können eine Vielzahl von logischen Operationen in Folge durchgeführt werden, wobei der Ablauf gemäß Figur 2 entsprechend mehrfach durchlaufen wird. Die Schritte 1 und 2 können insbesondere dann modifiziert sein, wenn ein Endzustand des magnetischen Elements nach einer logischen Operation gerade dem gewünschten Startzustand für die folgende logische Operation

entspricht. In diesem Fall kann auf Schritt 2 verzichtet werden, da die Einstellung des magnetischen Elements durch die vorhergehende logische Operation erfolgt ist.

Eine erfindungsgemäß verwendbare Verknüpfung des MR-Elements 11 mit den Eingängen 14, 15 und dem Ausgang 16 ist beispielhaft in Figur 3 dargestellt. Als MR-Element ist ein GMR-Element mit zwei magnetischen Schichten 12 und 13 mit den jeweiligen Magnetisierungen M_{12} und M_{13} und den dazugehörigen Koerzitivfeldstärken H_{c12} und H_{c13} vorgesehen, wobei im gewählten Beispiel H_{c12} kleiner als H_{c13} ist. Die Reihenfolge der Schichten mit verschiedenen Koerzitivfeldstärken kann bei einer abgewandelten Gestaltung umgekehrt sein. Die Schichten 12 und 13 sind voneinander magnetisch isoliert, wie es von herkömmlichen MR-Elementen bekannt ist. Der am Ausgang 16 als Ausgangsgröße 0 (Output) abgreifbare Spannungsabfall (Messspannung) ist von der relativen Ausrichtung der beiden Magnetisierungen zueinander abhängig.

Das GMR-Element 12, 13 wird durch drei Signal-Leiter A, B und C (Input) bestromt, die mit den Eingängen 14, 15 und der Steuerschaltung 20 verbunden sind. Die drei unabhängigen Signal-Leiter A, B und C sind voneinander elektrisch isoliert und werden mit den jeweiligen Strömen I_A , I_B und I_C beaufschlagt, deren Beträge zweckmäßigerweise gleich sein können. Die dadurch erzeugten Magnetfelder H_A , H_B und H_C überlagern sich und dienen erfindungsgemäß sowohl als SET-Funktion als auch als logisches Eingangssignal. Die Signal-Leiter A, B und C sind in Figur 3 nur aus Übersichtlichkeitsgründen mit Abstand gezeichnet. In der Praxis können sie sich berühren oder sogar durch einen gemeinsamen Signal-Leiter mit Anschlüssen für die Eingänge 14, 15 und die Steuerschaltung 20 gebildet werden.

Für das in den Figuren 4, 5 dargestellte Schema sind die Verhältnisse zwischen den von den Signal-Leitern erzeugten Magnetfeldern H_A , H_B und H_C und den Koerzitivfeldstärken H_{C12} und H_{C13} wie folgt: jedes Feld H_A , H_B und H_C für sich ist kleiner als H_{C12} , die Summe $H_A + H_B$ sei größer als H_{C12} aber kleiner als H_{C13} , die Summe $H_A + H_B + H_C$ sei größer als H_{C13} . Somit wird erreicht, das kein Strom für sich eine der beiden Magnetisierungen drehen kann. Die Ströme der Signal-Leiter A und B drehen nur gemeinsam die Magnetisierung von Schicht 12, während die Magnetisierung von Schicht 13 nur durch alle drei Eingangsströme zusammen gedreht werden kann. Dies gilt nur für jeweils gleichsinnige Ströme; gegensinnige Ströme annullieren sich gegenseitig.

Die mit den Stromrichtungen repräsentierten logischen Eingangsgrößen werden z. B. durch die Stromsignale I_A , I_B gebildet. Die jeweilige Stromrichtung $+I$ wird mit der durch sie bevorzugten Magnetisierungsrichtung $+M$ identifiziert, die im Folgenden durch Pfeile nach rechts versinnbildlicht werden (s. Figur 3). Diese Stromrichtung ($+I$) wird mit einer logischen "1", die entgegengesetzte Stromrichtung ($-I$) wird mit einer logischen "0" identifiziert. Des weiteren stellt ein hoher Magnetowiderstand (Magnetisierungen antiparallel) eine logische "0" als Output dar, ein niedriger (Magnetisierungen parallel) eine logische "1". Diese globalen Festlegungen definieren das Schaltverhalten der Logikeinrichtung. Die Bestromung kann in kurzen, getakteten Pulsen (Dauer je nach Anwendung z. B. im fs- bis ms-Bereich, Frequenz z. B. im GHz- bis kHz-Bereich) erfolgen, so dass der Energieverbrauch und damit die Erwärmung des Elements kleinstmöglich gehalten werden kann.

Durch die erfindungsgemäße, gezielte Bestromung der drei Signal-Leiter lassen sich bei Schritt 2 (Figur 2) die vier prinzipiell möglichen, magnetisch unterscheidbaren Konfigurationen eines einzelnen GMR-Elements als Startzustände definiert in

zwei Teilschritten darstellen, wie es in Figur 4 schematisch zusammengefasst ist.

Die Beaufschlagung mit dem Operator-Steuersignal (SET-Sequenz) besteht aus zwei aufeinanderfolgenden Teilschritten. Zunächst wird durch gleichzeitige Bestromung aller drei Signal-Leiter A, B und C die Richtung der Magnetisierung der hartmagnetischen Schicht 13 eingestellt: z. B. führt +I an allen Eingängen zu + M_{13} (Schicht 12 stellt sich genauso ein). Anschließend wird durch gleichzeitiges Bestromen von A und B nur noch die weichmagnetische Schicht 12 eingestellt, z. B. führt -I an den Eingängen A und B zu - M_{12} ; M_{13} wird nicht weiter beeinflusst. In der linken Spalte von Figur 4 sind die vier Varianten von möglichen Startzuständen gezeigt.

Die logische Operation (Schritte 3, 4, 5 in Figur 2) umfasst die folgende Eingabe der Eingangsgrößen. Zuerst werden die Eingänge 14 und 15 und entsprechend die Signal-Leiter A und B getrennt mit Stromsignalen beaufschlagt. Bei gleichsinnigen Strömen (Signal-Leiter A und B beide auf +I oder -I) beider Eingänge ist ein Drehen der Magnetisierung möglich. Anderfalls (gegensinnige Ströme) ist ein Drehen der Magnetisierung ausgeschlossen. Je nach der softwaremäßig gewählten SET-Sequenz erhält man daraus verschiedene Endzustände nach der logischen Operation. Wenn der Endzustand parallel ist, so ist der Magnetowiderstand niedrig und die Ausgangsgröße (Output) eine logische "1". Wenn der Endzustand antiparallel ist, so ist der Magnetowiderstand hoch und die Ausgangsgröße ist eine logische "0".

Die jeweils vier möglichen Ausgangsgrößen aus den vier verschiedenen Startzustände sind in den Logiktabellen in der rechten Spalte von Figur 4 zusammengefasst. Diese entsprechen den vier Logikfunktionen OR, AND, NOR und NAND. Die logische OR-Funktion (erste Zeile, Figur 4) ergibt sich beispielsweise wie folgt.

Zuerst wird die logische Funktion OR mittels der SET-Sequenz festgelegt. Im ersten Teilschritt wird Schicht 13 auf +M gelegt, indem an alle drei Signal-Leiter A, B und C +I angelegt wird. Anschließend wird Schicht 12 auf +M gelegt und damit OR definiert, indem die Signal-Leiter A und B mit +I bestromt werden. Nun liegen die Magnetisierungen parallel nach rechts und damit ist der Magnetowiderstand niedrig (logische "1"). Dann werden im zweiten Schritt die Signal-Leiter A und B getrennt bestromt, um die logische Operation auszuführen. Es ergeben sich die folgenden vier Möglichkeiten:

1. Werden beide Signal-Leiter auf "0" gesetzt, d. h. mit -I beaufschlagt, wird die Magnetisierung von Schicht 12 gedreht; die Magnetisierungen liegen nun antiparallel; der Magnetowiderstand ist hoch und damit der Output auf "0" (s. oberste Zeile in der Logiktablelle).
2. Wird Signal-Leiter A auf "0" und Signal-Leiter B auf "1" gesetzt, d.h. mit -I bzw. +I beaufschlagt, kompensieren sich die beiden Felder gerade und die durch die SET-Sequenz eingestellte Magnetisierung bleibt erhalten (Output "1").
3. Signal-Leiter A auf "1" und Signal-Leiter B auf "0" ist äquivalent zu Fall 2 (Output "1").
4. Werden beide Signal-Leiter auf "1" gesetzt, d.h. mit +I beaufschlagt, stellt dies nur die Wiederholung des zweiten Teilschritts der SET-Sequenz dar, was die Schicht 12 nochmals auf +M setzt. Die Ausgangsgröße ist wiederum "1", da die beiden Magnetisierungen weiterhin parallel zueinander liegen.

Für alle Möglichkeiten 1 bis 4 bleibt die Magnetisierung des Stellelementes 13 erhalten. Vorteilhafterweise wird eine voll-

ständige Logiktablelle bereitgestellt, die in diesem Falle die OR-Funktion darstellt.

Die erfindungsgemäße Abfolge der Beschaltung ist in Figur 5 am Beispiel einer logischen AND- mit anschließender NOR-Sequenz veranschaulicht, die den in Figur 4 markierten Logikfunktionen entsprechen.

Einer SET-Sequenz (Schritt 2 in Figur 2) aus zwei Teilschritten a) und b) folgt ein Schritt zum Ausführen der logischen Operation (Schritte 3, 4) und ein weiterer Schritt zum Auslesen der Ausgabe (Schritt 5). Der erste Teilschritt wählt über die Schicht 13 die Logik auf Nichtnegation ($-M_{13}$) oder Negation ($+M_{13}$) vor. Der zweite Teilschritt setzt die logische Operation auf OR ($+M_{12}$) oder AND ($-M_{12}$). Die anschließende Ausführung der logischen Operation kann ein Wechsel der Magnetisierungsrichtung der Schicht 12 zur Folge haben (wie im zweiten gezeigten Fall) oder nicht (wie im ersten Fall). Der abschließende Leseschritt kann zweckmäßigerweise durch Beaufschlagung von einem der drei Signal-Leiter (im gezeigten Fall über Signal-Leiter C) mit einem Lesestrom erfolgen, der durch das MR-Element läuft und über die Ausgangsleitung 16 abgreifbar ist. Es besteht alternativ die Möglichkeit, das Auslesen analog zum Aufbau gemäß Figur 8 mit einem vom Signal-Leiter getrennten Stromkreis zu realisieren, in den die Ausgangsleitung 16 eingebunden ist.

Nach Ausführung der logischen Funktion ist vorteilhafterweise erfindungsgemäß kein gesonderter RESET erforderlich, da die nächsten zwei SET-Teilschritte das MR-Element wiederum in einen der vier definierten Zustände versetzen. Es können sich auch Vorteile daraus ergeben, dass abhängig von der Ausgabe der vorherigen Logikfunktion die nachfolgende Logikfunktion bereits vorgewählt ist und die SET-Sequenz eventuell entfallen kann.

Eine alternative Ausführungsform der Erfindung mit nur zwei Eingängen ist in Figur 6 illustriert. Wenn auf die dritte Signal-Leitung C verzichtet wird, kann die hartmagnetischere Schicht 13 nur über größere Ströme I_A/I_B ummagnetisiert werden. Trotzdem können analog zu den obigen Betrachtungen auch bei fester Magnetisierungsrichtung der Schicht 13 (Modus 'pinned') immer noch zwei logische Operationen (OR und AND) ausgeführt werden, wobei die SET-Sequenz nicht zwei Teilschritte, sondern nur einen Schritt umfasst, bei dem die Schicht 12 parallel (OR) oder antiparallel (AND) zur Schicht 13 eingestellt wird.

Ein wichtiger Vorteil der Erfindung kann in der Kompatibilität mit dem Betrieb von Speichereinrichtungen bestehen. Verzichtet man vollständig auf die logische Operation, so wird eine Schaltung bereitgestellt, die wie ein übliches MRAM-Speicherelement funktioniert.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Erfindung eine frei-programmierbare Logikeinrichtung bereitstellt, die auf mindestens zwei magnetischen Stellelementen beispielsweise mindestens eines einzelnen MR-Elementes mit mindestens zwei Eingängen beruht. Mittels der erfindungsgemäßen Beschaltung der SET-Sequenz in ein oder zwei Teilschritten ist es möglich, sich zwei oder vier grundlegende Logikfunktionen (OR, AND, NOR und NAND) mit einem einzigen Bauelement zugänglich zu machen, ohne das weitere Mittel wie Spannungen, magnetische Felder oder weitere MR-Elemente notwendig sind.

Figur 7 zeigt ausschnittsweise eine erfindungsgemäße Logikschaltung 30 mit einer Vielzahl von matrixartig angeordneten Logikeinrichtungen 10. Jede der Logikeinrichtungen 10 kann analog zu Figur 1 mit einer eigenen Steuerschaltung ausgestattet sein. Alternativ können mehrere oder alle Logikeinrichtungen 10 jeweils mit einer gemeinsamen Steuerschaltung verbunden sein. Die Logikeinrichtungen 10 sind vorzugsweise als integrierte Schaltung an-

geordnet und über ein Netzwerk 40 von Schreib- und Leseleitungen verknüpft, wie es an sich von herkömmlichen FGPA-Schaltungen oder MRAM-Arrays bekannt ist.

Die in der vorstehenden Beschreibung, den Ansprüchen und den Zeichnungen offenbarten Merkmale der Erfindung können sowohl einzeln als auch in Kombination für die Verwirklichung der Erfindung in ihren verschiedenen Ausgestaltungen von Bedeutung sein.

PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zum Betrieb einer magnetischen Logikeinrichtung (10), bei dem durch mindestens eine logische Operation aus Eingangsgrößen (I_A , I_B) mit einer Operatorfunktion F der magnetischen Logikeinrichtung (10) mindestens eine Ausgangsgröße $O = F(I_A, I_B)$ gebildet wird,
dadurch gekennzeichnet, dass
die Logikeinrichtung (10) vor der Operation mit einem bestimmten Operator-Steuersignal (SET) auf einen Startzustand zur Ausführung der Operatorfunktion F eingestellt wird, wobei das Operator-Steuersignal aus einer Gruppe von Steuersignalen ausgewählt wird, mit denen verschiedene nichtflüchtige Startzustände gezielt einstellbar sind, die jeweils für verschiedene logische Funktionen charakteristisch sind.
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem mit den Steuersignalen Startzustände einstellbar sind, die jeweils für eine logische Funktion aus der Gruppe der logischen AND-, OR-, NAND- und NOR-Funktionen charakteristisch sind.
3. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem mit den Steuersignalen Startzustände einstellbar sind, die jeweils für eine logische Funktion aus der Gruppe der logischen AND- und OR-Funktionen oder der logischen NAND- und NOR-Funktionen charakteristisch sind.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Steuersignale Steuerstromsignale umfassen, unter deren Wirkung Magnetfelder erzeugt werden, durch die in der Logikeinrichtung (10) die jeweilige logische Funktion eingestellt wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, bei dem die Steuerstromsignale über Eingangsleitungen (14, 15, A, B, C) zur Eingabe der Eingangsgrößen (I_A , I_B) in die Logikeinrichtung (10) zugeführt werden.
6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, bei dem die Steuerstromsignale konstante Strombeträge aufweisen.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 4 bis 6, bei dem die Steuerstromsignale getaktete Ströme umfassen.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Logikeinrichtung (10) zur Eingabe der logischen Eingangsgrößen (I_A , I_B) mit Eingangsstromsignalen beaufschlagt wird.
9. Verfahren nach Anspruch 8, bei dem die Eingangsstromsignale und die Steuerstromsignale die gleichen Beträge aufweisen.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die magnetische Logikeinrichtung (10) mindestens ein magnetisches Element (11) mit mindestens zwei magnetischen Stellelementen (12, 13) enthält, die mit dem Operator-Steuersignal (SET) zur Ausführung der Operatorfunktion F eingestellt werden.
11. Verfahren nach Anspruch 10, bei dem das magnetische Element (11) zwei magnetische Stellelemente (12, 13) enthält, wobei die Koerzitivfeldstärken und die Strombeträge der Eingangsstromsignale so abgestimmt werden, dass beide Stellelemente durch das Operator-Steuersignal verstellt werden können.
12. Verfahren nach Anspruch 10, bei dem das magnetische Element (11) zwei magnetische Stellelemente (12, 13) enthält, wobei die Koerzitivfeldstärke von einem der Stellelemente

(13) so hoch gewählt ist, dass es mit den Eingangsstromsignalen nicht verstellt werden kann.

13. Verfahren zum Betrieb einer magnetischen Logikschaltung (30), die eine Vielzahl von Logikeinrichtungen (10) umfasst, mit denen gleichzeitig oder aufeinander folgend eine Vielzahl logischer Operationen gemäß einem Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche ausgeführt werden.

14. Verfahren nach Anspruch 13, bei dem jede Logikeinrichtung (10) aufeinander folgend gleiche oder verschiedene logische Operationen ausführt.

15. Logikeinrichtung (10) mit mindestens einem magnetischen Element (11), mindestens zwei Eingängen (14, 15) und mindestens einem Ausgang (16), wobei die Logikeinrichtung (10) zur Ausführung mindestens einer logischen Operation vorgesehen ist, bei der aus Eingangsgrößen (I_A , I_B) mit einer Operatorfunktion F mindestens eine Ausgangsgröße $O = F(I_A, I_B)$ gebildet wird,

dadurch gekennzeichnet, dass

das magnetische Element (11) mit einer Steuerschaltung (20) verbunden ist, die zur Bereitstellung eines Operator-Steuersignals, das aus einer Gruppe von Steuersignalen ausgewählt ist, mit denen verschiedene nichtflüchtige, für verschiedene logische Funktionen charakteristische Startzustände der Logikeinrichtung (10) einstellbar sind, und zur Einstellung der Logikeinrichtung (10) auf einen dem Operator-Steuersignal entsprechenden Startzustand eingerichtet ist.

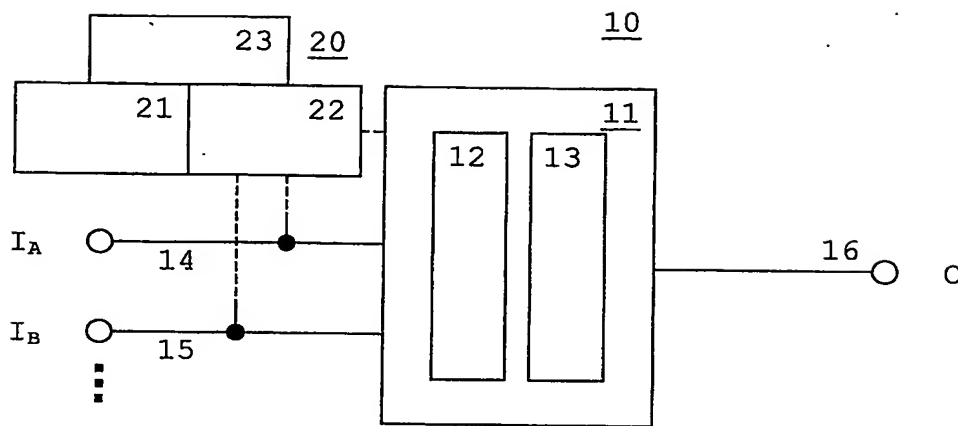
16. Logikeinrichtung (10) nach Anspruch 15, bei der die Steuerschaltung (20) eine Stromquelle (21) und eine Schalteinrichtung (22) aufweist, mit der das magnetoresistive Element (11) mit dem Operator-Steuersignal beaufschlagt werden kann.

17. Logikeinrichtung (10) nach Anspruch 15 oder 16, bei der die Steuerschaltung (20) einen Operatorfunktions-Wähler (23) aufweist, mit dem das Operator-Steuersignal wählbar ist.
18. Logikeinrichtung (10) nach einem der Ansprüche 15 bis 17, bei der das magnetische Element ein magnetoresistives Element (11) umfasst.
19. Logikschaltung (30), die eine Vielzahl von Logikeinrichtungen (10) nach einem der vorhergehenden Ansprüche 15 bis 18 aufweist.
20. Logikschaltung nach Anspruch 19, bei der jede Logikeinrichtungen (10) mit einer separaten Steuerschaltung (20) verbunden ist.
21. Logikschaltung nach Anspruch 19, bei der die Logikeinrichtungen (10) gruppenweise oder sämtlich mit einer gemeinsamen Steuerschaltung (20) verbunden sind.

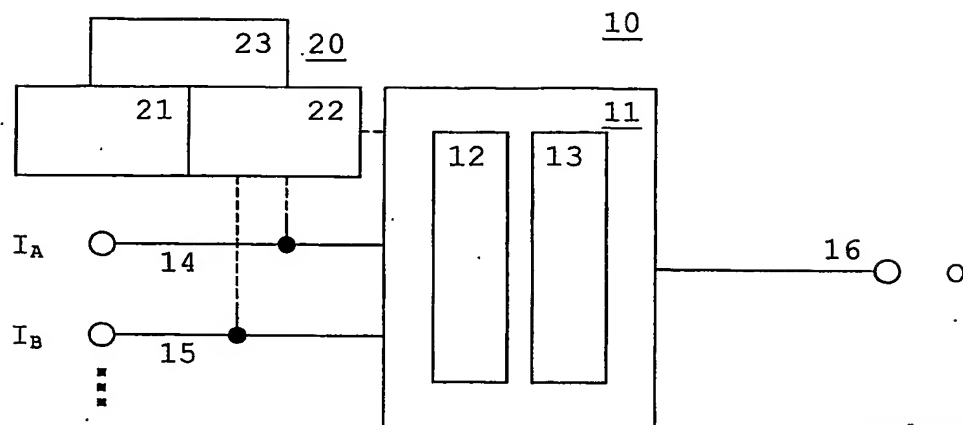
Zusammenfassung

Es wird ein Verfahren zum Betrieb einer magnetischen Logikeinrichtung (10) beschrieben, bei dem durch mindestens eine logische Operation aus Eingangsgrößen (I_A , I_B) mit einer Operatorfunktion F der magnetischen Logikeinrichtung (10) mindestens eine Ausgangsgröße $O = F(I_A, I_B)$ gebildet wird, wobei die Logikeinrichtung (10) vor der Operation mit einem bestimmten Operator-Steuersignal (SET) auf einen Startzustand zur Ausführung der Operatorfunktion F eingestellt wird, wobei das Operator-Steuersignal aus einer Gruppe von Steuersignalen ausgewählt wird, mit denen verschiedene nichtflüchtige Startzustände gezielt einstellbar sind, die jeweils für verschiedene logische Funktionen charakteristisch sind. Es wird ferner eine magnetische Logikeinrichtung (10) beschrieben, die zur Umsetzung dieses Verfahrens eingerichtet ist.

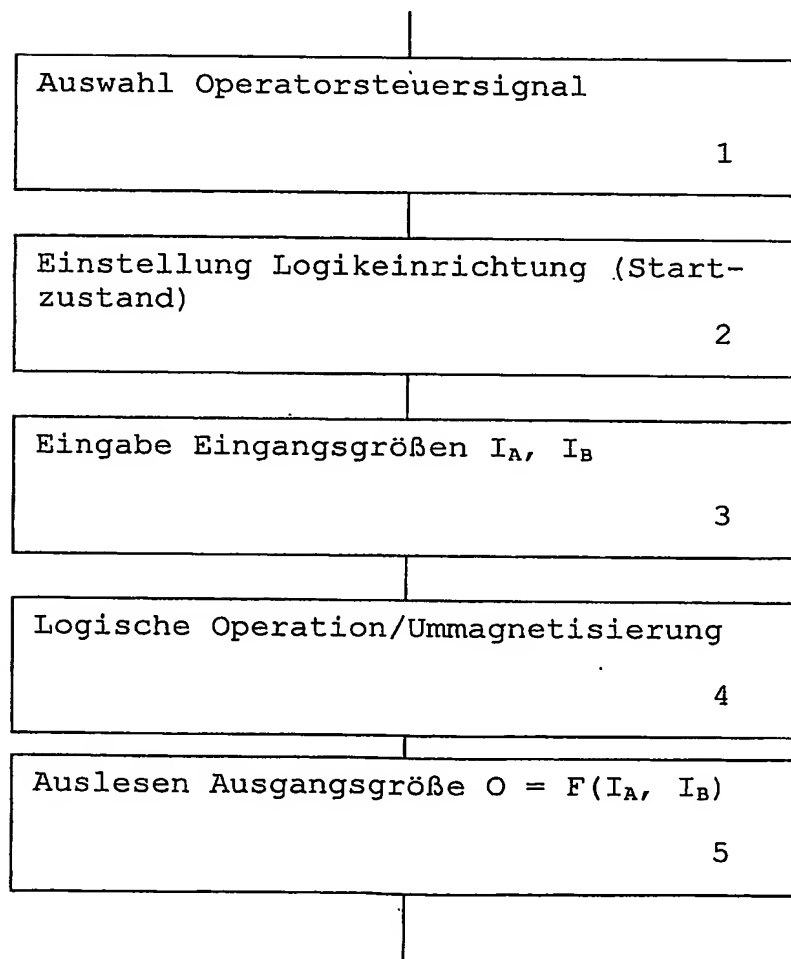
(Fig. 1)



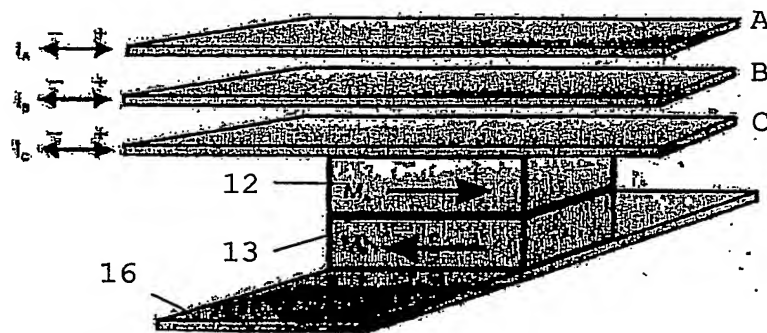
Figur 1



Figur 1



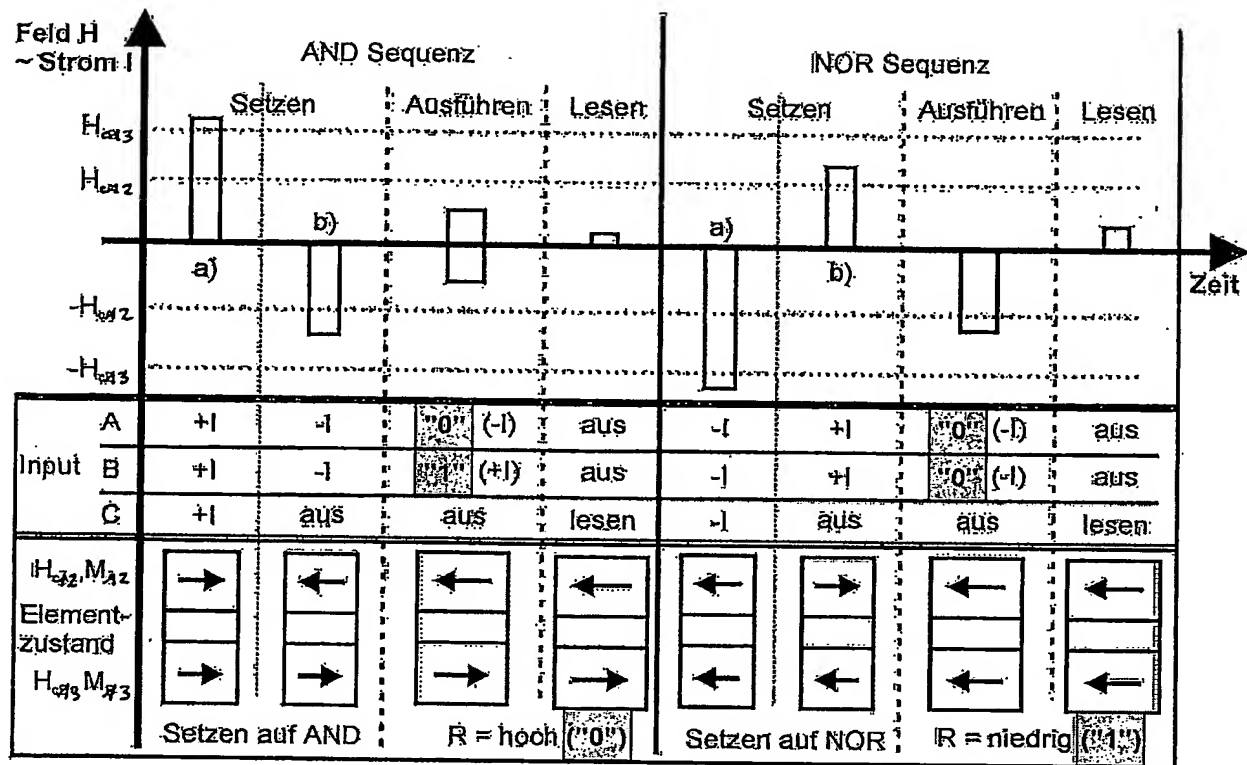
Figur 2



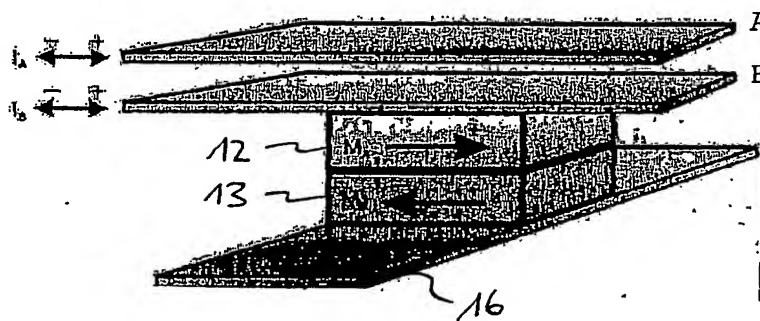
Figur 3

SET-Sequenz für Ausgangszustand	input A = 1 (0) input B = 1 (0)	input A = 1 (0) input B = 1 (1)	input A = 1 (1) input B = 1 (0)	input A = 1 (1) input B = 1 (1)	Logiktablelle															
 A,B,C=+1 A,B=+1	 R = high (0)	 R = low (1)	 R = low (1)	 R = low (1)	<table><tr><th>A</th><th>B</th><th>out</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table> OR	A	B	out	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1
A	B	out																		
0	0	0																		
1	0	1																		
0	1	1																		
1	1	1																		
 A,B,C=+1 A,B=-1	 R = high (0)	 R = high (0)	 R = high (0)	 R = low (1)	<table><tr><th>A</th><th>B</th><th>out</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr></table> AND	A	B	out	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1
A	B	out																		
0	0	0																		
1	0	0																		
0	1	0																		
1	1	1																		
 A,B,C=-1 A,B=+1	 R = low (1)	 R = high (0)	 R = high (0)	 R = high (0)	<table><tr><th>A</th><th>B</th><th>out</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table> NOR	A	B	out	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0
A	B	out																		
0	0	1																		
1	0	0																		
0	1	0																		
1	1	0																		
 A,B,C=-1 A,B=-1	 R = low (1)	 R = low (1)	 R = low (1)	 R = high (0)	<table><tr><th>A</th><th>B</th><th>out</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table> NAND	A	B	out	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0
A	B	out																		
0	0	1																		
1	0	1																		
0	1	1																		
1	1	0																		

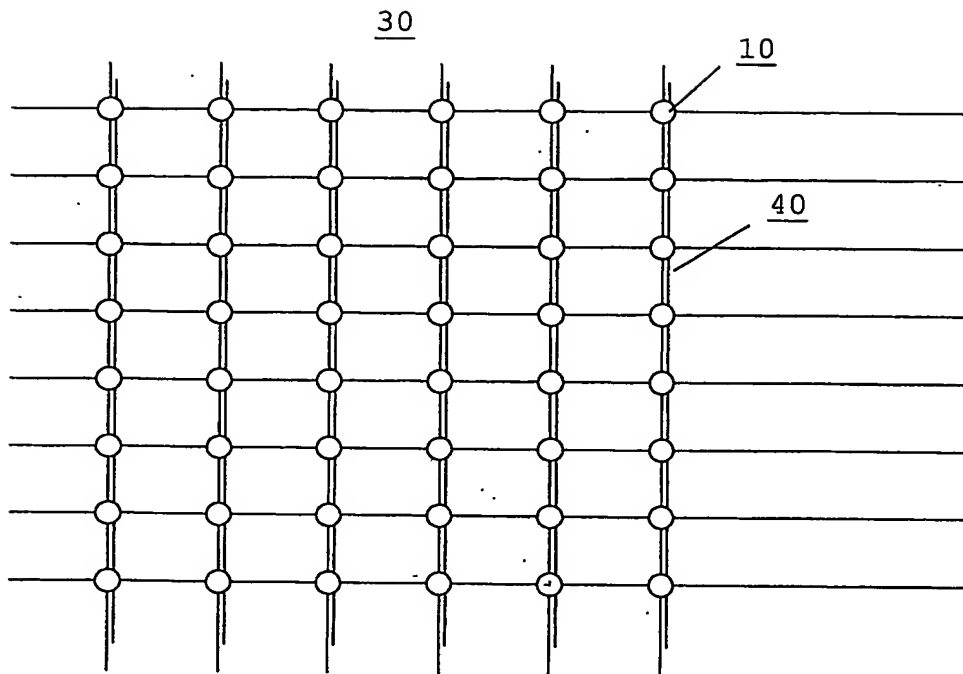
Figur 4



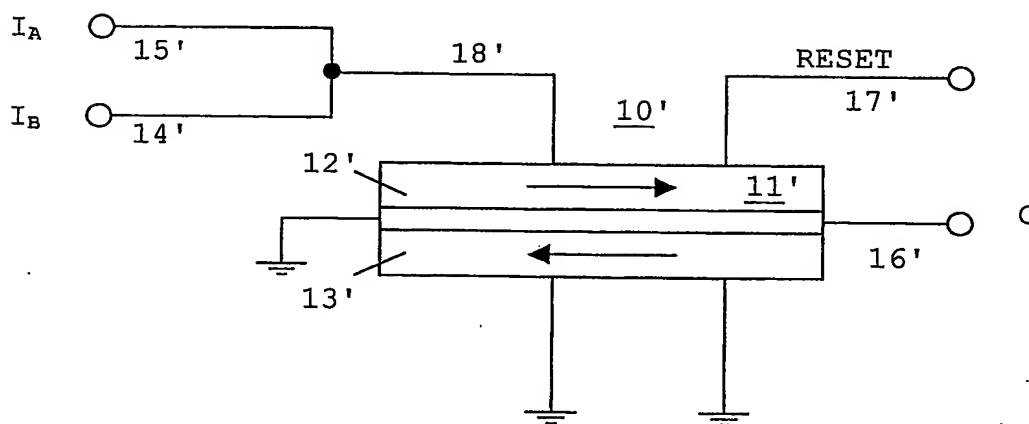
Figur 5



Figur 6



Figur 7



Figur 8
(Stand der Technik)

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☒ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.